

DOI: 10.32347/2076-815x.2022.79.446-462

УДК 681.5.015.8:519

к.т.н., доц. **Човнюк Ю.В.**,
uchovnyuk@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0608-0203,
Національний авіаційний університет, м. Київ,
доцент **Чередніченко П.П.**,
petro_che@ukr.net, ORCID: 0000-0001-7161-661X,
к.т.н., **Москвітіна А.С.**,
moskvitina.as@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-3352-0646,
Київський національний університет будівництва і архітектури

МОДЕЛЮВАННЯ ТА АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ МІКРОКЛІМАТУ ПРИМІЩЕННЯ З ЕЛЕМЕНТАМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Вичерпаність традиційних паливних ресурсів та погіршення екології довкілля, збільшення викидів в атмосферне повітря надає актуальності дослідженням по ефективному використанню енергетичних ресурсів у системах забезпечення мікроклімату приміщень. Перспективним напрямком є підвищення ступеня інтелектуалізації керування, а також врахування умов життєдіяльності людини та впровадження особливостей суб'єктивної оцінки процесів та подій у технічних системах. Питання контролю та регулювання параметрів мікроклімату у всіх типах приміщень, де важливим фактором є комфортні умови для перебування людини або забезпечення необхідних параметрів для технологічного процесу, є завданням систем з нечіткою логікою. Інтелектуальні системи управління оцінюють параметри мікроклімату в приміщенні і автоматично обирають режим роботи відповідних пристроїв, які забезпечують комфортні параметри цього мікроклімату з ефективним використання енергоресурсів для цього. У даній статті обґрунтована модель та алгоритм розрахунку параметрів системи регулювання мікроклімату приміщення з елементами штучного інтелекту (на основі методів теорії нечітких множин). Запропоновано застосування математичного апарату фуззі-логіки для вирішення задачі розробки системи керування мікрокліматом приміщень, що дозволяє врахувати у технічній системі суб'єктивні фактори сприйняття людиною параметрів оточуючого середовища. Розглянуто різні випадки регулювання параметрів мікроклімату приміщення та узагальнено правила регулювання параметрів мікроклімату приміщень до їх комфортних значень.

Ключові слова: штучний інтелект; управління системами забезпечення мікроклімату; нечітка логіка; система керування; мікроклімат приміщень; кондиціонування; температура; вологість

Постановка проблеми. Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вичерпаність традиційних паливних ресурсів та погіршення екології довкілля, збільшення викидів в атмосферне повітря надає актуальності дослідженням по ефективному використанню енергетичних ресурсів у системах забезпечення мікроклімату приміщень. Перспективним напрямком є підвищення ступеня інтелектуалізації керування, а також врахуванню умов існування людини та впровадження особливостей суб'єктивної оцінки процесів та подій у технічних системах.

Питання контролю та регулювання параметрів мікроклімату у всіх типах приміщень, де важливим фактором є комфортні умови для перебування людини або забезпечення необхідних параметрів для технологічного процесу. Інтелектуальні системи управління оцінюють параметри мікроклімату в приміщенні і автоматично обирають режим роботи відповідних пристроїв, які забезпечують комфортні параметри цього мікроклімату з ефективним використання енергоресурсів для цього. Вибір ґрунтується на практичному аналізі - за еталон беруться усереднені побажання людей, що користуються цим приміщенням, а також нормативні показники температури, вологості та забрудненості повітря, які необхідні для комфортного перебування людини в приміщенні або для забезпечення технологічного процесу. Крім того, враховується зміна температурно-вологісних показників у приміщенні при зміні внутрішніх або зовнішніх умов. Виходячи з цього актуальною є проблема створення моделі та алгоритму розрахунку параметрів системи регулювання мікроклімату приміщення з елементами штучного інтелекту на основі методів теорії нечітких множин. Оскільки, на сьогоднішній день розробка та впровадження в реальні системи керування електронного та електротехнічного обладнання нечіткої, або фуззі-логіки, є одним із шляхів створення системи ефективного штучного інтелекту. Фуззі-логіка дає можливість зробити використання обладнання забезпечення мікроклімату більш ефективним, зменшуючи витрати на експлуатацію.

Існуючі методи комплексного керування системами забезпечення мікроклімату з позиції методів регулювання наведено у роботах [1-9]. До традиційних методів керування параметрами мікроклімату у приміщенні, таких як двопозиційне керування або керування на основі ПД-алгоритму [1, 4], долучилися більш сучасні й складні алгоритми, такі як керування на основі

нечіткої логіки [1, 4, 5] та керування за допомогою багатовимірного лінійно-квадратичного цифрового регулятора в просторі стану [7, 8].

Основна перевага нечітких логічних контролерів порівняно з традиційними підходами керування полягає в тому, що для проектування контролера не потрібна математична модель об'єкта керування [4]. Нечіткі контролери розроблені на основі людських знань про поведінку системи. Крім того, контролери, які безпосередньо регулюють параметри мікроклімату, мають переваги над традиційними термостатичними системами [10].

Актуальність дослідження. З підписанням Угоди про асоціацію з ЄС Україна прийняла ряд зобов'язань щодо зменшення витрат первинної енергії, у т.ч. і системами опалення, вентиляції кондиціонування повітря та зменшити енергозатратність виробництва. Поряд з цим потребує вирішення і проблема забруднення довкілля, викликана збільшенням викидів забруднювальних речовин у атмосферне повітря. Все це вимагає проектування надійних і ефективних систем забезпечення мікроклімату, які не тільки забезпечать комфортне перебування людей в приміщенні та необхідні умови для технологічних процесів, але і підвищать коефіцієнт використання енергії за рахунок прогнозування роботи системи та основі людських знань про поведінку системи.

Формулювання цілей статті. Мета даної роботи полягає у обґрунтуванні моделі та алгоритму розрахунку параметрів системи регулювання мікроклімату приміщення з елементами штучного інтелекту (на основі методів теорії нечітких множин). Запропоновано застосування математичного апарату фуззі-логіки для вирішення задачі розробки системи керування мікрокліматом приміщень, що дозволяє врахувати у технічній системі суб'єктивні фактори сприйняття людиною параметрів оточуючого середовища.

1. Модель. Вважаємо, що повітря приміщення має дві компоненти: 1) власне повітря (гази); 2) пари води (H_2O). Основні характеристики такої суміші є такими: а) тиск (p); б) температура (T); в) відносна вологість такої суміші (повітря+ пари води) (α); г) швидкість руху компонент цієї суміші у даному приміщенні (v). Повітря та пари води розглядаємо у подальшому як ідеальні гази, тобто для них виконуються закони Дальтона та Менделєєва-Клапейрона. Загальний тиск у приміщенні складається з двох компонент: 1) статичного тиску; 2) динамічної складової тиску. У подальшому індексом «п» позначаємо характеристики та параметри повітряних мас приміщення, а індексом «в» - характеристики та параметри водяних парів приміщення. Зрозуміло, що загальний тиск у приміщенні повинен відповідати певним мікрокліматичним нормам цього приміщення, тому його величина повинна бути постійною

(деякою константою) [10,11]. Отже, маємо для загального тиску приміщення наступну формулу (з урахуванням закону Дальтона):

$$p_{\Pi} + \frac{\rho_{\Pi} \cdot v^2}{2} + p_B + \frac{\rho_B \cdot v^2}{2} = const. \quad (1)$$

(У даній моделі вважаємо, що швидкість руху повітря та парів води у приміщенні однакова й дорівнює $v_{\Pi} = v_B = v$). Зрозуміло, що $\rho_{\Pi} \ll \rho_B$, $p_{\Pi} \gg p_B$, а саме повітря приміщення (у цілому) – ненасичене водяними парами, тому остаточно з (1) маємо:

$$p_{\Pi} + \frac{\rho_B \cdot v^2}{2} \cong const. \quad (2)$$

Або (з урахуванням закону Менделєєва-Клапейрона):

$$\frac{m_{\Pi}}{\mu_{\Pi} \cdot V} \cdot R \cdot T + \frac{\rho_B \cdot v^2}{2} \cong const, \quad (3)$$

де m_{Π} – маса повітря, яке знаходиться у даному приміщенні; μ_{Π} – маса 1 кг-моля повітря (складає приблизно 29 кг/кмоль); V – об'єм даного приміщення; R – універсальна газова постійна. Точна формула (без вказаних вище наближень) має такий вид:

$$\left(\frac{m_{\Pi}}{\mu_{\Pi}} + \frac{m_B}{\mu_B} \right) \cdot \frac{1}{V} \cdot R \cdot T + \left(\frac{\rho_{\Pi} + \rho_B}{2} \right) \cdot v^2 = const. \quad (4)$$

У (4) $\mu_B = 18$ кг/кмоль. Після введення відносної вологості повітря α з (4) маємо:

$$\left(\frac{m_{\Pi}}{\mu_{\Pi}} + \frac{\alpha \cdot m_{Bнас}(T)}{\mu_B} \right) \cdot \frac{1}{V} \cdot R \cdot T + \left(\frac{\rho_{\Pi} + \rho_B}{2} \right) \cdot v^2 = const, \quad (5)$$

де α визначене у відносних одиницях (як частина одиниці, не у процентах), а $m_{Bнас}(T)$ – маса водяних парів при даній температурі, що відповідає стану насиченого повітря даного приміщення. У подальшому вважаємо, що:

$$\frac{m_{\Pi}}{\mu_{\Pi}} \cdot \frac{1}{V} \cdot R \cdot T = p_{атм}, \quad (6)$$

де $p_{атм}$ – атмосферний тиск у даному приміщенні. Тоді (5) набуває вигляду:

$$p_{атм} + \frac{\alpha \cdot m_{Bнас}(T)}{\mu_B} \cdot \frac{1}{V} \cdot R \cdot T + \left(\frac{\rho_{\Pi} + \rho_B}{2} \right) \cdot v^2 = const. \quad (7)$$

У подальшому розглядатимемо співвідношення (7) за таких умов:

$$p_{атм} = const_1; \quad \frac{m_{Bнас}(T)}{\mu_B} \cdot \frac{1}{V} \cdot R = C_1 = const_2; \quad \frac{\rho_{\Pi} + \rho_B}{2} = C_2 = const_3. \quad (8)$$

Тоді з (7) із урахуванням (8) випливає наступне співвідношення:

$$C_1 \cdot \alpha \cdot T + C_2 \cdot v^2 = const - p_{атм} = const - const_1 = \overline{const} = C. \quad (9)$$

Подальше регулювання параметрів мікроклімату приміщення даного типу будемо здійснювати, виходячи зі співвідношення:

$$C_1 \cdot \alpha \cdot T + C_2 \cdot v^2 = C. \quad (10)$$

У (10) C – деяка, визначена наперед для даного типу приміщення константа, відносно якої регулюються параметри мікроклімату даного приміщення (α, T, v).

2. Регулювання параметрів мікроклімату приміщення.

Виходячи зі співвідношення (10), математична модель процесу регулювання параметрів мікроклімату приміщення полягає у тому, що повний диференціал від виразу, що стоїть у лівій частині (10), дорівнює нулю, оскільки у правій частині (10) знаходиться деяка константа [10-13]. Тому маємо:

$$d(C_1 \cdot \alpha \cdot T + C_2 \cdot v^2) = 0. \quad (11)$$

Замінюючи повний диференціал функції від (α, T, v) – аргументів, що стоїть під його знаком у (11), на скінченні зміни аргументів цієї функції, матимемо:

$$\Delta(C_1 \cdot \alpha \cdot T + C_2 \cdot v^2) = 0. \quad (12)$$

Або:

$$C_1 \cdot \{\Delta\alpha \cdot T + \alpha \cdot \Delta T\} + C_2 \cdot 2 \cdot v \cdot \Delta v = 0. \quad (13)$$

Поділимо вираз (13) почленно на $\alpha \cdot T \cdot v$. Тоді матимемо:

$$C_1 \cdot \left\{ \frac{\Delta\alpha}{\alpha \cdot v} + \frac{\alpha \cdot \Delta T}{T \cdot v} \right\} + C_2 \cdot 2 \cdot \frac{\Delta v}{T \cdot \alpha} = 0. \quad (14)$$

Вважаємо, що всі можливі відхилення параметрів α, T, v відбуваються відносно комфортних (наперед заданих санітарними вимогами для даного типу приміщення) нормативних значень цих параметрів α_k, T_k, v_k , тобто виконуються наступні співвідношення:

$$\{\alpha, T, v\} \Rightarrow \{\alpha_k, T_k, v_k\}; \quad \Delta\alpha = \alpha_{II} - \alpha_k; \quad \Delta T = T_{II} - T_k; \quad \Delta v = v_{II} - v_k, \quad (15)$$

де: $\alpha_{II}, T_{II}, v_{II}$ – поточні значення параметрів мікроклімату приміщення даного типу. Тоді (14) можна записати наступним чином:

$$\frac{C_1}{\alpha_k \cdot v_k} \cdot \Delta\alpha + \frac{C_1 \cdot \alpha_k}{T_k \cdot v_k} \cdot \Delta T + \frac{2 \cdot C_2}{\alpha_k \cdot T_k} \cdot \Delta v = 0. \quad (16)$$

Введемо наступні позначення:

$$a_1 = \frac{C_1}{\alpha_k \cdot v_k}; \quad a_2 = \frac{C_1}{T_k \cdot v_k}; \quad a_3 = \frac{2 \cdot C_2}{\alpha_k \cdot T_k}. \quad (17)$$

Зрозуміло, що всі комфортні параметри мікроклімату для даного типу приміщення задані і є деякими додатними константами відповідної розмірності, а тому за визначенням всі константи a_1, a_2, a_3 є теж додатними постійними величинами. Тоді (16) можна записати у вигляді:

$$a_1 \cdot \Delta\alpha + a_2 \cdot \Delta T + a_3 \cdot \Delta v = 0. \quad (18)$$

Рівняння (18) можна подати наступним чином:

$$\frac{\Delta\alpha}{(a_1^{-1})} + \frac{\Delta T}{(a_2^{-1})} + \frac{\Delta v}{(a_3^{-1})} = 0. \quad (19)$$

Якщо ввести позначення:

$$b_1 = a_1^{-1}; \quad b_2 = a_2^{-1}; \quad b_3 = a_3^{-1}, \quad (20)$$

тоді рівняння (19) можна подати наступним чином:

$$\frac{\Delta\alpha}{b_1} + \frac{\Delta T}{b_2} + \frac{\Delta v}{b_3} = 0. \quad (21)$$

По суті, (21) є рівнянням площини у тривимірному (ортогональному) декартовому просторі параметрів регулювання мікроклімату приміщення ($\Delta\alpha, \Delta T, \Delta v$), яка проходить через точку $(0;0;0)$. При цьому вектор нормалі \vec{n} до цієї площини (21) має такі компоненти:

$$\vec{n} = (n_1, n_2, n_3), \quad (22)$$

$$n_1 = \frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2}}; n_2 = \frac{a_2}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2}}; n_3 = \frac{a_3}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2}}.$$

Зрозуміло, що всі компоненти вектора \vec{n} є додатними за визначенням і такими, що лежать у межах:

$$0 < n_i < 1, \text{ для } \forall (\text{всіх}) i = \overline{(1,3)}. \quad (23)$$

Направляючі кути нормалі до площини регулювання ($\beta_i, i = \overline{(1,3)}$), які складає вектор нормалі \vec{n} {що проходить через точку $(0;0;0)$, у тривимірному просторі регулювання параметрів мікроклімату ($\Delta\alpha, \Delta T, \Delta v$)} з осями координат $\Delta\alpha, \Delta T, \Delta v$ знаходимо зі співвідношень:

$$\beta_i = \arccos\{n_i\}, \quad i = \overline{(1,3)}. \quad (24)$$

3. Розгляд різних випадків регулювання параметрів мікроклімату приміщення.

Регулювання параметрів мікроклімату приміщення здійснюємо у межах комфортності цих параметрів (α, T, v) для приміщення конкретного типу [14,15]. Отже, основне рівняння регулювання параметрів мікроклімату приміщення має вид (18). При цьому $\Delta\alpha, \Delta T, \Delta v$ визначаються співвідношеннями (15).

Ситуація 1. Відбувся зсув у той чи інший бік значення α відносно α_k . Знак $\Delta\alpha$ показує, у яку саме сторону відбувся зсув цього параметру. Використовуємо функцію знаку певної величини, яка називається sign («сігнум») і для $\Delta\alpha$ визначається наступним чином:

$$\begin{cases} \text{sign}(\Delta\alpha) = +1, & \alpha_{II} > \alpha_k; \\ \text{sign}(\Delta\alpha) = -1, & \alpha_{II} < \alpha_k; \\ \text{sign}(\Delta\alpha) = 0, & \alpha_{II} = \alpha_k. \end{cases} \quad (25)$$

(Кожне значення $\Delta\alpha$ можна подати у вигляді $|\Delta\alpha| \cdot \text{sign}(\Delta\alpha)$ для будь-яких співвідношень між α_{II} й α_k . $|\Delta\alpha|$ - означає модуль від величини $\Delta\alpha$).

Зі співвідношення (18) маємо:

$$|\Delta\alpha| \cdot \text{sign}(\Delta\alpha) = -\frac{a_2}{a_1} \cdot (\Delta T) - \frac{a_3}{a_1} \cdot (\Delta v) = \left(-\frac{a_2}{a_1}\right) \cdot |\Delta T| \cdot \text{sign}(\Delta T) + \left(-\frac{a_3}{a_1}\right) \cdot |\Delta v| \cdot \text{sign}(\Delta v). \quad (26)$$

Отже, для всіх трьох параметрів мікроклімату можна записати наступні співвідношення:

$$\begin{cases} |\Delta T| \cdot \text{sign}(\Delta T) = \left(-\frac{a_1}{a_2}\right) \cdot |\Delta \alpha| \cdot \text{sign}(\Delta \alpha) + \left(-\frac{a_3}{a_2}\right) \cdot |\Delta v| \cdot \text{sign}(\Delta v); \\ |\Delta v| \cdot \text{sign}(\Delta v) = \left(-\frac{a_1}{a_3}\right) \cdot |\Delta \alpha| \cdot \text{sign}(\Delta \alpha) + \left(-\frac{a_2}{a_3}\right) \cdot |\Delta T| \cdot \text{sign}(\Delta T). \end{cases} \quad (27)$$

Розбираємо один конкретний варіант регулювання параметрів мікроклімату приміщення, наприклад, $\Delta \alpha$. З першого рівняння (27) маємо чотири ситуації регулювання $\Delta \alpha$ (за наявності певного знаку у величині $\Delta \alpha$).

A. Нехай $\text{sign}(\Delta \alpha) = +1$, тоді з першого рівняння (27) маємо:

$$|\Delta \alpha| = \left(-\frac{a_2}{a_1}\right) \cdot |\Delta T| \cdot \text{sign}(\Delta T) + \left(-\frac{a_3}{a_1}\right) \cdot |\Delta v| \cdot \text{sign}(\Delta v). \quad (28)$$

A1. $\text{sign}(\Delta T) = +1$; $\text{sign}(\Delta v) = +1$. **Нічого не вийде!** Оскільки у (28) зліва стоїть величина додатна, а справа – від’ємна. Отже, регулюванням параметрів T, v у сторону їх підвищення порівняно з їх комфортними значеннями, ситуацію по вологості приміщення повернути до комфортного її значення неможливо.

A2. $\text{sign}(\Delta T) = +1$; $\text{sign}(\Delta v) = -1$. Тоді для $\Delta \alpha$ маємо:

$$|\Delta \alpha| = \left(-\frac{a_2}{a_1}\right) \cdot |\Delta T| + \frac{a_3}{a_1} \cdot |\Delta v|, \quad (29)$$

причому повинна виконуватись умова, за якої таке регулювання можливе (підвищення температури й зменшення швидкості руху повітря порівняно з їх комфортними значеннями):

$$\left(\frac{a_3}{a_1}\right) \cdot |\Delta v| > \left(\frac{a_2}{a_1}\right) \cdot |\Delta T| \Rightarrow a_3 \cdot |\Delta v| > a_2 \cdot |\Delta T|, \quad (30)$$

тобто при зростанні вологості відносно її комфортного значення повернути це значення назад до комфортної величини **можна** шляхом зменшення параметра v й збільшення параметра T відносно їх комфортних значень, але так, щоб виконувалась умова (30). При цьому комфортного значення (тобто $\Delta \alpha = 0$) можна досягти, якщо: $a_3 \cdot |\Delta v| = a_2 \cdot |\Delta T|$.

A3. $\text{sign}(\Delta T) = -1$, $\text{sign}(\Delta v) = +1$. Тоді для $\Delta \alpha$ маємо:

$$|\Delta \alpha| = \left(\frac{a_2}{a_1}\right) \cdot |\Delta T| - \left(\frac{a_3}{a_1}\right) \cdot |\Delta v|. \quad (31)$$

По суті, це повторення випадку **A2**, але комфортного значення α досягаємо іншим засобом, а саме шляхом зменшення температури й збільшення швидкості потоку повітря порівняно з їх комфортними значеннями. При цьому для досягнення комфортного значення α ($\Delta \alpha = 0$) знову необхідно виконати умову: $a_3 \cdot |\Delta v| = a_2 \cdot |\Delta T|$.

A4. $\text{sign}(\Delta T) = -1$; $\text{sign}(\Delta v) = -1$. Тоді для $\Delta \alpha$ маємо:

$$|\Delta \alpha| = \frac{a_2}{a_1} \cdot |\Delta T| + \frac{a_3}{a_1} \cdot |\Delta v|. \quad (32)$$

Таке регулювання знову **не можливе!** Повернутися назад, до комфортного значення α ($\Delta \alpha = 0$), виходячи з (32), неможливо, оскільки при прямуванні лівої

частини до нуля, права частина (32) є суто додатною величиною і тому ніколи не прийде до нуля.

Загальний висновок по ситуації А з регулюванням параметру α , який зріс порівняно з його комфортним значенням, шляхом зміни відносно комфортних значень параметрів T та v наступний:

$$(\Delta\alpha)\uparrow \Rightarrow \begin{cases} (A_2) \rightarrow (T)\uparrow, (v)\downarrow, a_3 \cdot |\Delta v| = a_2 \cdot |\Delta T|; \\ (A_3) \rightarrow (T)\downarrow, (v)\uparrow, a_3 \cdot |\Delta v| = a_2 \cdot |\Delta T|. \end{cases} \Leftrightarrow \text{регулювання можливе, а } \Delta\alpha \rightarrow 0. \quad (33)$$

Одночасне збільшення параметрів T, v (або їх одночасне зменшення) відносно комфортних значень для даного приміщення не призводить до бажаних результатів/наслідків, оскільки параметр α , що зріс, не прямує до його комфортного значення. Тому слід використовувати засоби і співвідношення для регулювання α у ситуації А, які відповідають A_2 й A_3 .

При регулюванні T (ситуація Б, $\text{sign}(\Delta T) = +1$) й v (ситуація В, $\text{sign}(\Delta v) = +1$) відповідно двома іншими параметрами, тобто (α, v) чи (α, T) всі закони регулювання повторюються, тобто: за однакових знаків змін двох величин **регулювання відсутнє**, а для різних знаків змін двох величин регулювання, повернення до комфортного значення регульованої величини **можливе!**

Г. Нехай $\text{sign}(\Delta\alpha) = -1$. Тоді для $\Delta\alpha$ маємо наступне співвідношення:

$$|\Delta\alpha| = \left(\frac{a_2}{a_1}\right) \cdot |\Delta T| \cdot \text{sign}(\Delta T) + \left(\frac{a_3}{a_1}\right) \cdot |\Delta v| \cdot \text{sign}(\Delta v). \quad (34)$$

Як і вище, у випадку А, повернення параметра α до його комфортного значення α_k **неможливе** при $\text{sign}|\Delta T| = \text{sign}|\Delta v|$, тобто одночасно $(T \downarrow, v \downarrow)$ або одночасно $(T \uparrow, v \uparrow)$, а лише за різних знаків (ΔT) й (Δv) , що еквівалентно умові:

$$\text{sign}(\Delta T) = -\text{sign}(\Delta v), \text{ причому } \{ \text{sign}(\Delta T), \text{sign}(\Delta v) \} \neq 0. \quad (35)$$

Узагальнення правил регулювання параметрів мікроклімату приміщення до їх комфортних значень (для даного типу приміщення)

Введемо позначення:

$$\Delta\alpha = X_i; \Delta T = X_j; \Delta v = X_k. \quad (36)$$

Тоді маємо наступне співвідношення, яке завжди повинне виконуватись:

$$a_i \cdot X_i + a_j \cdot X_j + a_k \cdot X_k = 0, \quad i \Leftrightarrow 1, \quad j \Leftrightarrow 2, \quad k \Leftrightarrow 3. \quad (37)$$

1. Для (всіх) $\forall \text{sign} X_i \neq 0$, при $\text{sign}(X_j) \neq 0$, $\text{sign}(X_k) \neq 0$, регулювання і відновлення комфортного значення X_i можливе за умови:

$$\text{sign}(X_i) = -\text{sign}(X_k), \quad a_i \cdot |X_i| = a_k \cdot |X_k|. \quad (38)$$

2. Для (всіх) $\forall \text{sign} X_j \neq 0$, при $\text{sign}(X_i) \neq 0$, $\text{sign}(X_k) \neq 0$, регулювання і відновлення комфортного значення X_j можливе за умови:

$$\text{sign}(X_j) = -\text{sign}(X_k), \quad a_j \cdot |X_j| = a_k \cdot |X_k|. \quad (39)$$

3. . Для (всіх) $\forall \text{sign} X_k \neq 0$, при $\text{sign}(X_i) \neq 0$, $\text{sign}(X_j) \neq 0$, регулювання і відновлення комфортного значення X_k можливе за умови:

$$\text{sign}(X_i) = -\text{sign}(X_j), \quad a_i \cdot |X_i| = a_j \cdot |X_j|. \quad (38)$$

Оскільки регулювання параметрів мікроклімату приміщення (α, T, v) пов'язане з відслідковуванням наступної функції:

$$C_1 \cdot \alpha \cdot T + C_2 \cdot v^2 = \overline{\text{const}} = C, \quad (39)$$

(причому тут v^2 слід розуміти як квадрат нечіткої функції v , а саме, як: $v^2 = v \cdot v$, а не як операцію con чи del від нечіткої функції v), тому у подальшому слід створити алгоритм програмування параметрів всіх трьох нечітких функцій α, T, v . Крім того, слід зазначити, що кожна зі вказаних вище нечітких функцій має свою область «комфортної» зміни, в залежності від того для кого вона визначена [16-18]: а) для власне конкретного типу приміщення; б) для людини, яка працює у цьому приміщенні; в) для об'єкту, котрий зберігається/знаходиться у цьому приміщенні (комп'ютери, художні цінності, тварини, обладнання тощо).

У подальшому позначимо:

$$X_1 = \alpha, \quad X_2 = T, \quad X_3 = v. \quad (40)$$

Для X_1, X_2, X_3 існує (згідно вище згаданим пунктам а), б), в)) три принаймні значення цих величин (для типу приміщення, для людей, які працюють чи знаходяться тривалий час у цьому типі приміщення, для об'єкту, що знаходиться у цьому типі приміщення), тому у подальшому позначатимемо ці регульовані нечіткі функції X_1, X_2, X_3 як відповідно $X_1^{(i)}, X_2^{(i)}, X_3^{(i)}$, $i = \overline{(1,3)}$, причому: $i=1$ відповідає параметру мікроклімату приміщення даного типу, $i=2$ відповідає параметру мікроклімату для знаходження людини у даному типі приміщення, а $i=3$ відповідає параметру мікроклімату приміщення для знаходження у ньому конкретного об'єкту (який може, наприклад, зберігатись у цьому приміщенні) [19]. У подальшому індекс i (у залежності від його значення) пов'язуємо з: типом приміщення, людиною або конкретним об'єктом, що знаходиться чи зберігається у цьому приміщенні. Чому потрібна така індексація? Відповідь: всі вищезгадані типи приміщень, людина, об'єкти, котрі зберігаються чи знаходяться у цьому приміщенні, мають свої суто власні нормативні значення для комфортного існування. Саме тому вводимо таку індексацію.

Згідно санітарним чи іншим нормативним вимогам, можна записати наступне:

$$\begin{cases} X_1^{(i)} \in [X_{1H}^{(i)}, X_{1B}^{(i)}] \\ X_2^{(i)} \in [X_{2H}^{(i)}, X_{2B}^{(i)}] \\ X_3^{(i)} \in [X_{3H}^{(i)}, X_{3B}^{(i)}] \end{cases} \quad (41)$$

де індекс «Н» та індекс «В» відповідно визначають нижню та верхню межі комфортних значень параметрів мікроклімату приміщення (тобто α, T, v) для i -го типу (тобто для типу приміщення; для людини у цьому приміщенні; для об'єкту, котрий знаходиться/зберігається у цьому приміщенні). У загальному випадку можна ввести для параметрів мікроклімату приміщення α, T, v індекс $j, j = \overline{(1,3)}$, а потім у загальному випадку записати співвідношення (41) наступним чином:

$$X_j^{(i)} \in [X_{jH}^{(i)}, X_{jB}^{(i)}], \quad i = \overline{(1,3)}; \quad j = \overline{(1,3)}. \quad (42)$$

Тоді стає зрозумілим те, що комфортні значення константи C у (39) теж лежать (внаслідок монотонності функції, що стоїть зліва у (39)) у наступних межах:

$$C^{(i)} \in [C_H^{(i)}; C_B^{(i)}] \quad (43)$$

де нижнє та верхнє значення константи $C^{(i)}$ визначаються співвідношеннями:

$$C_H^{(i)} = C_1 \cdot \alpha_H^{(i)} \cdot T_H^{(i)} + C_2 \cdot \left\{ v_H^{(i)} \right\}^2; \quad C_B^{(i)} = C_1 \cdot \alpha_B^{(i)} \cdot T_B^{(i)} + C_2 \cdot \left\{ v_B^{(i)} \right\}^2. \quad (44)$$

Для i -го значення параметри мікроклімату приміщення повинні регулюватись саме у цих межах зміни константи $C^{(i)}$.

Для функції належності $\mu(X_j^{(i)})$ приймаємо наступне: 1) вона є кусково-неперервною; 2) вона є симетричною трикутною (за геометричним видом/образом). Тому можемо записати:

$$\mu(X_j^{(i)}) = w \cdot \begin{cases} 0, & X_j^{(i)} < X_{jH}^{(i)}; \\ \frac{(X_j^{(i)} - X_{jH}^{(i)})}{(X_j^{(i)} - X_{jH}^{(i)})}, & X_{jH}^{(i)} \leq X_j^{(i)} \leq \overline{X_j^{(i)}}; \\ \frac{(X_j^{(i)} - \overline{X_j^{(i)}})}{(X_{jB}^{(i)} - \overline{X_j^{(i)}})}, & \overline{X_j^{(i)}} \leq X_j^{(i)} \leq X_{jB}^{(i)}; \\ 0, & X_j^{(i)} > X_{jB}^{(i)}. \end{cases} \quad w = \{0;1\} \quad (45)$$

Або:

$$\mu(X_j^{(i)}) = w \cdot \left\{ \frac{\left| \overline{X_j^{(i)}} - \left(X_j^{(i)} - \frac{(X_{jB}^{(i)} - X_{jH}^{(i)})}{2} \right) \right|}{\overline{X_j^{(i)}}} \right\}. \quad (46)$$

У (45) та (46) введемо позначення:

$$\overline{X_j^{(i)}} = \frac{(X_{jH}^{(i)} + X_{jB}^{(i)})}{2}. \quad (47)$$

Крок зміни значення параметру $X_j^{(i)}$ у межах $(X_{jH}^{(i)}, X_{jB}^{(i)})$ обираємо наступним:

$$\Delta X_j^{(i)} = \frac{X_{jB}^{(i)} - X_{jH}^{(i)}}{10}, \quad (48)$$

що відповідає 10-бальній шкалі зверхності, введеної вище. Таким чином, близькість чи віддаленість $X_j^{(i)}$ від нижньої чи верхньої межі його комфортних значень визначається кількістю n кроків $\Delta X_j^{(i)}$, на які це значення $X_j^{(i)}$ віддалене чи від $X_{jH}^{(i)}$, чи від $X_{jB}^{(i)}$. По суті це лінгвістична змінна, що характеризує поняття «біля» (чи $X_{jH}^{(i)}$, чи $X_{jB}^{(i)}$). Відповідно, оцінка «біля» визначається балом, набраним або відносно $X_{jH}^{(i)}$ (відповідає оцінка «наскільки віддалена» $X_j^{(i)}$ від нижньої межі комфортності, тобто $X_j^{(i)} = X_{jH}^{(i)} + n \cdot \Delta X_j^{(i)}$, $n = \overline{(0,10)}$), або відносно $X_{jB}^{(i)}$ (відповідає оцінка «наскільки наближена» $X_j^{(i)}$ до верхньої межі комфортності, тобто $X_j^{(i)} = X_{jB}^{(i)} - n \cdot \Delta X_j^{(i)}$, $n = \overline{(0,10)}$).

Отже, у подальшому введемо нечітку функцію параметрів мікроклімату:

$$X^{(i)} = \left\{ \frac{X_1^{(i)}}{\mu(X_1^{(i)})}; \frac{X_2^{(i)}}{\mu(X_2^{(i)})}; \frac{X_3^{(i)}}{\mu(X_3^{(i)})} \right\} = \left\{ \frac{X_j^{(i)}}{\mu(X_j^{(i)})} \right\}; \quad j = \overline{(1,3)}; \quad i = \overline{(1,3)}. \quad (49)$$

Можна для нечіткої функції параметрів мікроклімату приміщення $X^{(i)}$, введеної вище, подати й таку інтерпретацію $X^{(i)} = \left\{ \frac{X_1^{(i)}}{\mu(X_1^{(i)})}; \frac{X_2^{(i)}}{\mu(X_2^{(i)})}; \frac{X_3^{(i)}}{\mu(X_3^{(i)})} \right\}$, яка характеризує [20]: 1) параметр $X_1^{(i)}$ «біля» комфортної вологості $\overline{X_1^{(i)}}$; 2) параметр $X_2^{(i)}$ «біля» комфортної температури $\overline{X_2^{(i)}}$; 3) параметр $X_3^{(i)}$ «біля» комфортної швидкості руху повітряних мас (у приміщенні) $\overline{X_3^{(i)}}$.

За введеними вище правилами створюємо наступні нечіткі функції з власними функціями розподілу значень цих функцій:

$$1) Y_1^{(i)} = C_1 \cdot X_1^{(i)} \cdot X_2^{(i)}; \quad 2) Y_2^{(i)} = C_2 \cdot \{X_3^{(i)}\}^2 \equiv C_2 \cdot X_3^{(i)} \cdot X_3^{(i)}; \quad 3) Y_3^{(i)} = Y_1^{(i)} + Y_2^{(i)}. \quad (50)$$

У подальшому для кожного значення i працюємо лише з функцією $Y_3^{(i)}$. Саме для такої функції у попередньому практичному занятті були визначені всі основні правила (і умови) регулювання параметрів мікроклімату $(\alpha^{(i)}, T^{(i)}, v^{(i)})$ до їх комфортних значень $(\alpha_k^{(i)}, T_k^{(i)}, v_k^{(i)})$.

Таким чином, ми встановлюємо закон регулювання для кожної $Y_3^{(i)}$. Позначимо такі закони регулювання наступним чином:

$$i = 1 \Rightarrow 3\{Y_3^{(1)}\}; \quad i = 2 \Rightarrow 3\{Y_3^{(2)}\}; \quad i = 3 \Rightarrow 3\{Y_3^{(3)}\} \quad (51)$$

Загальний закон регулювання параметрів мікроклімату всієї системи («тип приміщення – людина – об'єкт, що знаходиться/зберігається у приміщенні даного типу») визначається як перетин трьох законів регулювання:

$$\text{Загальний закон регулювання параметрів мікроклімату приміщення: } \equiv Z(Y_3^{(1)}) \cap Z(Y_3^{(2)}) \cap Z(Y_3^{(3)}). \quad (52)$$

Висновки: Обґрунтована модель та алгоритм розрахунку параметрів системи регулювання мікроклімату приміщення з елементами штучного інтелекту (на основі методів теорії нечітких множин). Запропоновано застосування математичного апарату фуззі-логіки для вирішення задачі розробки системи керування мікрокліматом приміщень, що дозволяє врахувати у технічній системі суб'єктивні фактори сприйняття людиною параметрів оточуючого середовища. Розглянуто різні випадки регулювання параметрів мікроклімату приміщення та узагальнено правила регулювання параметрів мікроклімату приміщень до їх комфортних значень.

Бібліографічний список:

1. Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования воздуха / Е.С. Бондарь, А.С. Гордиенко, В.А. Михайлов, Г.В. Нимич. - Київ: ТОВ «Видавничий будинок «Аванпост-Прим», 2005. - 560 с.
2. Grahame M. Budd. Wet-bulb globe temperature (WBGT) - its history and its limitations/M.Budd Grahame / Grahame M. Budd // Journal of Science and Medicine in Sport. - 2008. - p. 20-32.
3. Thom E.C. The discomfort index / E.C. Thom // Weather wise. - 1959. - Vol.12. - pp. 57-60.
4. Logical analysis of Madam-type fuzzy inference. I.Theoretical bases I S.Bova, P.Codara, D. Maccari, V.A. Marra // IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Barcelona. - 2010. - pp. 1-8.
5. Fuzzy Expert System to Control the Heating, Ventilating and Air Conditioning (HVAC) Systems I Siham A.M. Almasani, Wadea A. A. Qaid, Ahmed Khalid, Ibrahim A.A. Alqubati // International Journal of Engineering Research Technology (IJERT). - 2015. - Vol.4. - pp. 808-815.
6. Новиков С.И. Методы нечеткой логики в задачах автоматизации тепловых процессов электростанций / С.И. Новиков, В.Р. Шахневич, А.В. Сафронов // Вестник ИГЭУ. - ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». - 2010. - №4. - С. 72-75.
7. Голінко І.М. Оптимізація багатовимірних систем керування для комплексів штучного мікроклімату / І.М. Голінко, І.Є. Галицька // Прикарпатський вісник НТШ. Число. - 2016. - №1. - С.61-73.

8. Голінко І.М. Аналіз системи керування для штучного мікроклімату за методом «точки роси» /І.М. Голінко, В. Г. Трегуб И Восточно-Европейский журнал передових технологій. - 2011. - №2. - С.53-55.
9. П.В. Новиков. Fuzzy-контроллер підтримання мікроклімату в приміщенні за значеннями індексу дискомфорту / Новіков П.В., Степанець О.В., Саков Р.П. // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. -2017.-Т.9, ВИП.4.-С. 76-83.
10. Човнюк Ю.В. Концептуальні основи створення мехатронних систем керування мікрокліматом музейних приміщень з використанням нечітких логічних контролерів (регуляторів) / Ю.В. Човнюк, М.Г. Диктерук, В.Б. Довгалюк, О.М. Складенко // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. - 2018. - Вип. 27. - С. 6-17.
11. Щепотьєв О.І. Теорія оптимізації / О.І. Щепотьєв, А.В. Жильцов. - Київ: ТОВ ЦП «Компрінт», 2017. - 242с.
12. Субботін С.О., Олійник А.О., Олійник О.О. Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткіологічних і нейромережових моделей. Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. 375с.
13. Quijano N., Passino K.M. Honey bee social foraging algorithms for resource allocation: theory and application. Columbus: Publishing house of the Ohio State University. 2007. 39p.
14. Kim D.H., Cho C.H. Bacterial foraging based neural network fuzzy learning. Proceedings of the 2nd Indian International Conference on Artificial Intelligence (IIICAI 2005). Pune: IIICAI, 2005. P. 2030-2036.
15. Engelbrecht A.A study of particle swarm optimization particle trajectories. Information Sciences, 2006. N 176(8). P. 937-971.
16. H.A. Shayanfar. Self tuning Fuzzy PI controller for active filter optimized by Ant colony method/ H.A. Shayanfar and R. Navabi: in 2010 1st Power Electronic & Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC), 2010, pp. 351-356.
17. K.A. Rani. Fathima Intelligent controller based three phase shunt active filter for THD reduction in non-linear load and capacitor voltage stability/ K.A. Rani Fathima and T.A. Raghavendiren: in 2014 2nd International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS), 2014, pp. 1-7
18. A.A. Rajan. Fuzzy logic based three-level shunt active filter for harmonics and torque ripple reduction in brushless DC motor drive/ A.A. Rajan and S. Vasantharathna: in 2014 International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS), 2014, pp. 1-5.
19. S. Musa. Fuzzy logic controller based three phase shunt active power filter for harmonics reduction/ S. Musa, M.A.M. Radzi, H. Hisham, and N. I. Abdulwahab: in 2014 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON), 2014, p.371-376.

20. J.W. Dixon A fuzzy-controlled active front-end rectifier with current harmonic filtering characteristics and minimum sensing variables/ J. W. Dixon, J. M. Contardo, and L. A. Moran: IEEE Trans. Power Electron., vol. 14, no. 4, pp. 724-729, Jul. 1999.

к.т.н., доцент **Човнюк Ю.В.**,
Национальный авиационный университет,
доцент **Чередниченко П.П.**, к.т.н. **Москвитина А.С.**,
Киевский национальный университет строительства и архитектуры

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ МИКРОКЛИМАТА ПОМЕЩЕНИЯ С ЭЛЕМЕНТАМИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА.

Исчерпанность традиционных топливных ресурсов и ухудшение экологии окружающей среды, увеличение выбросов в атмосферный воздух придает актуальность исследованиям по эффективному использованию энергетических ресурсов в системах обеспечения микроклимата помещений. Перспективным направлением является повышение степени интеллектуализации управления, а также учет условий жизнедеятельности человека и внедрение особенностей субъективной оценки процессов и событий в технических системах. Вопросы контроля и регулирования параметров микроклимата во всех типах помещений, где важным фактором являются комфортные условия для пребывания человека или обеспечение необходимых параметров для технологического процесса, является задачей систем с нечеткой логикой. Интеллектуальные системы управления оценивают параметры микроклимата в помещении и автоматически выбирают режим работы соответствующих устройств, обеспечивающих комфортные параметры этого микроклимата с эффективным использованием энергоресурсов для этого. Выбор основывается на практическом анализе - за эталон берутся усредненные пожелания пользующихся этим помещением людей, а также нормативные показатели температуры, влажности и загрязненности воздуха, которые необходимы для комфортного пребывания человека в помещении или для обеспечения технологического процесса. Кроме того, учитывается изменение температурно-влажностных показателей в помещении при изменении внутренних или внешних условий. В данной статье обоснована модель и алгоритм расчета параметров системы регулирования микроклимата помещения с элементами искусственного интеллекта (на основе методов теории нечетких множеств). Предложено применение математического аппарата фuzzi-логики для решения задач разработки системы управления

микроклиматом помещений, что позволяет учесть в технической системе субъективные факторы восприятия человеком параметров окружающей среды. Рассмотрены разные случаи регулирования параметров микроклимата помещения и обобщены правила регулирования параметров микроклимата помещений к их комфортным значениям.

Ключевые слова: искусственный интеллект; управление системами обеспечения микроклимата; нечеткая логика; система управления; микроклимат помещений; кондиционирование; температура; влажность.

PhD, associate professor **Chovniuk Yuriy**,
National Aviation University of Ukraine

Associate Professor **Cherednichenko Petro**, PhD, assistant **Moskvitina Anna**,
Kyiv National University of Construction and Architecture

MODELING AND ALGORITHM FOR CALCULATION OF PARAMETERS OF THE ROOM MICROCLIMATE REGULATION SYSTEM WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE ELEMENTS.

The depletion of traditional fuel resources and the deterioration of the ecology of the environment, an increase in emissions into the atmospheric air makes research on the efficient use of energy resources in indoor climate control systems topical. A promising direction is to increase the degree of intellectualization of management, as well as to take into account the conditions of human life and the introduction of features of subjective assessment of processes and events in technical systems. The issues of control and regulation of microclimate parameters in all types of premises, where comfortable conditions for a person's stay or ensuring the necessary parameters for the technological process are an important factor, is the task of systems with fuzzy logic. Intelligent control systems evaluate the parameters of the microclimate in the room and automatically select the operating mode of the corresponding devices that provide the comfortable parameters of this microclimate with the efficient use of energy resources for this. The choice is based on practical analysis - the average wishes of people using this room, as well as standard indicators of temperature, humidity and air pollution, which are necessary for a comfortable stay of a person in a room or to ensure a technological process, are taken as a standard. In addition, the change in temperature and humidity indicators in the room is taken into account when the internal or external conditions change. This article substantiates a model and an algorithm for calculating the parameters of a room microclimate control system with elements of artificial intelligence (based on the methods of the theory of fuzzy sets). The application of the mathematical apparatus of fuzzy-logic for solving the problems

of developing a control system for the microclimate of premises is proposed, which makes it possible to take into account the subjective factors of human perception of the parameters of the environment in the technical system. Various cases of regulating the parameters of the microclimate of the premises are considered and the rules for regulating the parameters of the microclimate of the premises to their comfortable values are generalized.

Key words: artificial intelligence; control of microclimate systems; fuzzy logic; control system; indoor microclimate; air conditioning; temperature; humidity.

REFERENCE:

1. Bondar E.S., Gordienko A.S., Mikhailov V.A., Nimich G.V. Avtomatizatsiya sistem ventilyatsii i kondit-sionirovaniia vozdukhai. Avanpost-Prim, 2005. {in Russian}
2. Grahame M.Budd. "Wet-bulb globe temperature (WBGT) - its history and its limitations/M.Budd Grahame." Journal of Science and Medicine in Sport, 2008, pp. 20-32. {in English}
3. Thom E.C. "The discomfort index." Weather wise, 1959, Vol.12, pp. 57-60. {in English}
4. Bova S., Codara P., Maccari D., Marra V.A. "Logical analysis of Madam-type fuzzy inference." IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Barcelona, 2010, pp.1-8. {in English}
5. Siham A.M. Almasani, Wadea A.A.Qaid, Ahmed Khalid, Ibrahim A.A. Alqubati. "Almasani. Fuzzy Exspert System to Control the Heating, Ventilating and Air Conditioning (HVAC) Systems." International Journal of Engineering Research Technology (IJERT), 2015, Vol.4, pp. 808-815. {in English}
6. Novikov S.I., Shakhnevich V.R., Safronov A.V. "Metody nechetkoy logiki v zadachakh avtomatizatsii teplovykh protsessov na energeticheskikh ustanovkakh." Vestnik ISEU, GOUVPO «Ivanovskiy gosudarstvennyy ener-geticheskiy universitet imeni V.I. Lenina», no. 4, 2010. {in Russian}
7. Golinko I.M., Galitskiy I.E. "Optimizatsiya bakhatovimnykh sistem keravannya dlya kompleksa shtuchnogo Mikroklimatu." Prikarpat'skiy visnik NTSh. Chislo, no. 1,2016, pp. 61-73. {in Ukrainian}
8. Golinko I.M., Trehub V.H. "Analiticheskaya sistema keruvannya dlya kusochnogo mikroklimita dlya metoda «tochki rosi»." Vostochno-yevropeyskiy zhurnalperedovykh tekhnologiy, no. 2, 2011, pp. 53-55. {in Ukrainian}
9. Novikov P.V, Stepanets O.V, Sakov R.P. "Nchetkiy kontroller pidtrimannya mikroklimatu v primishchenni za znachennikh indeksu diskomfortu." Avtomatizatsiia tekhnologicheskikh i biznes-protsessov, vol. 9, vip. 4, 2017. {in Ukrainian}

10. Chovnyuk YU. V. Kontseptual'ni osnovy stvorennya mekhatronnykh system keruvannya mikroklimatom muzeynykh prymishchen' z vykorystanniam nechitkykh lohichnykh kontroleriv (rehulyatoriv) / YU.V. Chovnyuk, M.H. Dykteruk, V.B. Dovhalyuk, O.M. Sklyarenko // Ventylyatsiya, osvittennya ta teplohazopostachannya. - 2018. - Vyp. 27. - P. 6-17. {in Ukrainian}
11. Shchepotiev O. I., Zhiltsov A. V. Teoriia optimizatsii. Comprint, 2017. {in Ukrainian}
12. Subbotin S.O., Oliynyk A.O., Oliynyk O.O. Neiteratyvni, evolyutsiyni ta mul'tyahentni metody syntezy nechitkolohichnykh i neyromerezhevykh modeley. Zaporizhzhya: ZNTU, 2009. {in Ukrainian}
13. Quijano N., Passino K.M. Honey bee social foraging algorithms for resource allocation: theory and application. Columbus: Publishing house of the Ohio State University. 2007. 39p. {in English}
14. Kim D.H., Cho C.H. Bacterial foraging based neural network fuzzy learning. Proceedings of the 2nd Indian International Conference on Artificial Intelligence (IICAI 2005). Pune: IICAI, 2005. P. 2030-2036. {in English}
15. Engelbrecht A.A study of particle swarm optimization particle trajectories. Information Sciences, 2006. N 176(8). P. 937-971. {in English}
16. H.A. Shayanfar. Self tuning Fuzzy PI controller for active filter optimized by Ant colony method/ H.A. Shayanfar and R.Navabi: in 2010 1st Power Electronic & Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC), 2010, pp. 351-356. {in English}
17. K.A. Rani. Fathima Intelligent controller based three phase shunt active filter for THD reduction in non-linear load and capacitor voltage stability/ K. A. Rani Fathima and T. A. Raghavendiren: in 2014 2nd International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS), 2014, pp. 1-7 {in English}
18. A.A. Rajan. Fuzzy logic based three-level shunt active filter for harmonics and torque ripple reduction in brushless DC motor drive/ A. A. Rajan and S. Vasantharathna: in 2014 International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS), 2014, pp. 1-5. {in English}
19. S. Musa. Fuzzy logic controller based three phase shunt active power filter for harmonics reduction/ S. Musa, M.A.M. Radzi, H. Hisham, and N.I. Abdulwahab: in 2014 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON), 2014, p.371-376. {in English}
20. J.W. Dixon A fuzzy-controlled active front-end rectifier with current harmonic filtering characteristics and minimum sensing variables/ J.W. Dixon, J. M. Contardo, and L. A. Moran: IEEE Trans. Power Electron., vol. 14, no. 4, pp. 724-729, Jul. 1999. {in English}